

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Využití mikroturbín v MS kraji
Utilization Microturbine of MS Region

Student: Petr Kufa
Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.

Ostrava 2009

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Kufa**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí
Specializace: 70 Technika tvorby a ochrany životního prostředí
Téma: **Využití mikroturbín v MS kraji**
Utilization Mikroturbine of MS Region

Zásady pro vypracování:

V závěrečné práci bakalářského studia proved'te rešerši principů a stavby mikroturbín s možností využití pro spalování důlních plynů v MS kraji.

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUSAL, M.: *Spalovací turbíny*, SNTL. 1980
ŠUROVSKÝ, J.: *Mikroturbína*. Instalace Praha, 2003.

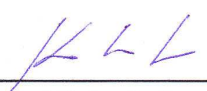
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.**

Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009




prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 22.05.2009

.....

Petr Kufa

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Petr Kufa
Mosty u Jablunkova 690
739 98

V Ostravě 22.05.2009

.....

Petr Kufa

Anotace bakalářské práce

KUFA, P. *Využití mikroturbín v MS kraji*. Ostrava: Katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 31 s. Bakalářská práce, vedoucí: Kolarčík, K.

Bakalářská práce obsahuje teoretický rozbor stavby spalovacích turbín. Je zde popsán princip kogenerace a trigenerace. Malé spalovací turbíny jsou rozděleny do tří skupin podle elektrického výkonu. Podrobně jsou popsány mikroturbíny a jejich základní části, jako například kompresor, spalovací komora turbína atd. V této práci jsou porovnány pístové motory a mikroturbíny, které se používají v kogeneračních jednotkách.

KUFA, P. *Utilization Microturbine of MS Region*. Ostrava: Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2009, 31 p. Thesis, head: Kolarčík, K.

This thesis contains theoretical analysis of combustion turbine design. There is described principle of cogeneration and trigeneration. Small combustion turbines are divided into three groups according to their electrical power. Microturbines and their basic parts like for example compressor, combustion chamber, turbine etc. are detailed described. In this thesis are compared piston engines and microturbines, which are using in cogeneration units.

Obsah:

Použité značení, zkratky a pojmy	7
1 Úvod	9
2 Kogenerace	9
3 Teorie spalovacích turbín	10
3.1 Kompresor	11
3.2 Spalovací komora	12
3.3 Turbína	12
3.4 Termodynamický princip	12
3.5 Rozdělení spalovacích turbín podle výkonu	15
4 Mikroturbíny	16
4.1 Regenerační výměník (rekuperátor)	17
4.2 Spalinový výměník	18
4.3 Sací a výfukový trakt	18
4.4 Palivové hospodářství	19
4.5 Elektrické součásti	20
4.6 Způsoby provozu kogenerační jednotky s mikroturbínou	23
5 Srovnání mikroturbíny s pístovým spalovacím motorem	25
6 Možnosti využití v MS kraji	27
6.1 Zemní plyn	28
6.1 Bioplyn	28
6.2 Důlní plyn	29
7 Závěr	30
8 Použité zdroje	31
9 Přílohy	31

Použité značení, zkratky a pojmy:

Označení	Název	Jednotka
T	termodynamická teplota	[K]
T_{ie}	termodynamická teplota po izoentropické změně	[K]
a_k	práce spotřebovaná kompresorem	[J/kg]
a_t	práce vykonaná turbínou	[J/kg]
a_0	celková práce Braytonova oběhu	[J/kg]
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J/kg·K]
p	tlak	[Pa]
q_a	teplo dodané ve spalovací komoře	[J/kg]
s	měrná entropie	[J/kg·K]
v	měrný objem	[m ³ /kg]
ε_p	kompresní poměr	[1]
κ	Poissonova konstanta	[1]

Zkratky

<i>CZT</i>	centrální zdroj tepla (např. bloková kotelna)
<i>CNG</i>	stlačený zemní plyn
<i>ČOV</i>	čistička odpadních vod
<i>K</i>	kompresor spalovací turbíny
<i>LTO</i>	lehký topný olej
<i>RV</i>	regenerační výměník, rekuperátor
<i>SK</i>	spalovací komora
<i>T</i>	turbína
<i>TUV</i>	teplá užitková voda
<i>UPS</i>	Uninterruptible Power Supplies, zdroje „nepřerušitelného“ napájení
<i>ss (DC)</i>	stejnoseměrný proud (direct current)
<i>stř (AC)</i>	střídavý proud (alterting current)

Pojmy

<i>bypass</i>	obtok spalin kolem spalínového výměníku s vyústěním do komína
<i>degazace</i>	řízené odčerpávání důlních plynů s obsahem metanu z uhlé sloje, okolních hornin nebo volných prostor
<i>kogenerace</i>	současná výroba elektrické energie a tepla
<i>mikroturbína</i>	energetické zařízení s elektrickým výkonem asi do 200kW
<i>p – v diagram</i>	diagram závislosti tlaku na měrném objemu
<i>sorpční chladič</i>	zařízení využívající odpadní teplo k výrobě chladu např. pomocí rozdílné teploty vypařování vody za různých tlaků
<i>siloxany</i>	organické sloučeniny křemíku
<i>T – s diagram</i>	diagram závislosti termodynamické teploty na měrné entropii
<i>trigenerace</i>	současná výroba elektrické energie a tepla pro vytápění nebo chlazení pomocí sorpčních chladičů

1 Úvod

Práce bude provedena formou řešení principů a stavby spalovacích turbín se zaměřením na mikroturbíny jako kogenerační a trigenerační zdroje decentralizované výroby elektřiny. V práci se zmíním o možnostech využití jako stacionárních i mobilních zařízení, o možnostech využití vyprodukovaného tepla k topení a chlazení. Provedu srovnání s běžně používanými pístovými motory na plyn z hlediska nároků na prostor, poruchovosti, údržby a vlivu na životní prostředí. Dále zvážím možnosti využití mikroturbín v podmínkách Moravskoslezského kraje.

V kogeneračních jednotkách se již dlouhou dobu běžně používají pístové spalovací motory, které však mají řadu nevýhod především díky tomu, že jsou poměrně konstrukčně složité.

Některé firmy zabývající se spalovacími turbínami se proto rozhodly pro vývoj malých spalovacích turbín, tedy mikroturbín, které jsou konstrukčně jednoduché a tudíž i spolehlivější. Jejich vývoj byl finančně velmi náročný, ale firmy, které vývoj dotáhly až do konce, dnes slaví úspěch po celém světě.

Mikroturbíny úspěšně pracují např. v USA, Kanadě, Mexiku, Francii, Itálii, Německu, Španělsku nebo Číně. I u nás je instalováno několik jednotek, např. demonstrační zařízení v ČOV v Praze – Holešovicích o elektrickém výkonu 30kW, které spaluje bioplyn.

2 Kogenerace

U tradičních tepelných elektráren je výroba elektrické energie a tepla oddělena. V kotli se mění chemická energie paliva na teplo, které ohřívá a vypařuje vodu a následně přehřívá páru. Teplo tak zvyšuje entalpii páry. Vysokotlaká pára pak expanduje na parní turbíně, kde ztrácí tlak a roztáčí připojený generátor. Část entalpie se tak mění v turbíně na mechanickou energii a v generátoru na elektrickou energii. Nízkotlaká pára pak kondenzuje na trubkách kondenzátoru. V České republice jsou kondenzátory chlazeny hlavně vodou. Voda předává nízkopotenciální teplo vyexpandované páry do okolí převážně v chladicích věžích.

Každá změna energie však představuje ztrátu.

Klasický spalovací pístový motor využije pouze část tepla vzniklého z paliva k práci. Aby byla zajištěna funkčnost takového motoru, musí být zbylá část tepla (odpadní teplo) odvedena chladičem do okolí (podle 2. termodynamického zákona).

Kogenerační jednotky umožňují využít vznikající odpadní teplo pro ohřev vody nebo vzduchu pro další účely, případně pro výrobu páry. V těchto jednotkách tak dochází k současné produkci tepla a elektrické energie, tedy kogeneraci.

Kogeneraci ve velkém představují teplárny. Část horké páry z odběrové parní turbíny o dostatečném tlaku se využívá pro dálkové vytápění přilehlých sídlišť a domácností, případně slouží nedalekým podnikům.

Pro kogeneraci v malém se používají kogenerační jednotky, které reprezentují hlavně plynové motory nebo spalovací turbíny, ale také palivové články.

Plynové motory lze popsat jako odvozené z Ottova nebo Dieselova motoru, jejichž chladič slouží jako výměník tepla. Jejich nevýhodou je vysoký počet pohyblivých dílů (udává se i více než 100) a tedy i vyšší pravděpodobnost poruchy. Navíc se podle mnoha výrobců vývoj spalovacích motorů blíží k hranici možností a nelze tedy v budoucnu očekávat nějaký významnější pokrok.

Naproti tomu mají spalovací turbíny minimum pohyblivých dílů (často jen jeden) a proto se vyznačují vysokou spolehlivostí a dlouhou životností. Dále jsou charakteristické kompaktnějšími rozměry a nižší hmotností oproti stejně výkonným plynovým motorům, což umožňuje umístit je podle potřeby i do vyšších pater budov, případně umístit je na nákladní automobil a používat jako mobilní zdroj elektrické energie a tepla. Nezanedbatelná je rovněž nižší produkce emisí díky nepřerušovanému spalovacímu procesu. Spalovací turbíny mají před sebou další vývoj a jejich rozšíření povede ke snížení ceny, která je zatím v porovnání s plynovými motory vyšší.

3 Teorie spalovacích turbín

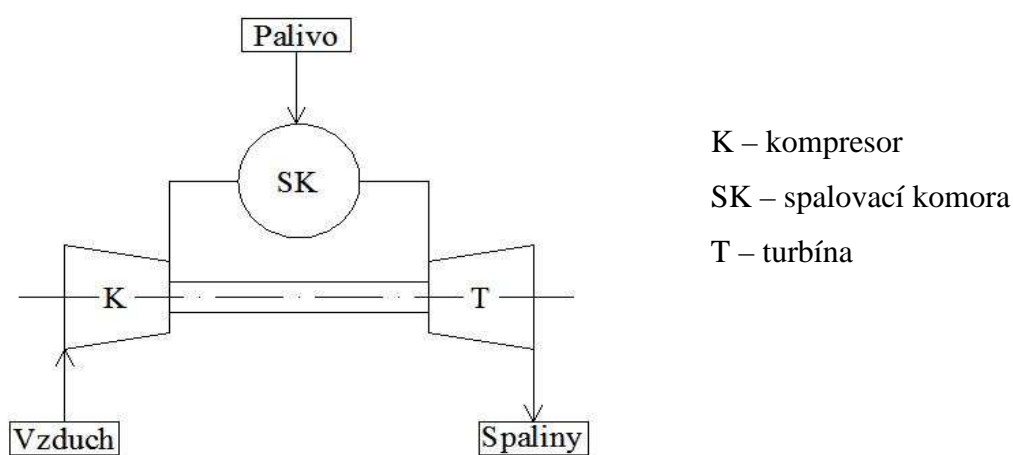
Spalovací turbína je tepelný stroj používaný již od 50. let 20. století v proudových motorech letadel (první pokusy s nasazením proudových motorů probíhaly již před 2. světovou válkou, během války došlo k jejich využití v prvních sériově vyráběných strojích na obou stranách – např. v britském Gloster Meteoru nebo německém Messerschmittu Me-262 Schwalbe [3]). Stále se zdokonaluje a modifikuje pro různá využití, ať už v dopravě

nebo energetice. Moderní typy dosahují vyšších výkonů při nižší spotřebě paliva, roste rovněž účinnost především díky materiálům lopatek turbín, snášejícím vyšší teploty.

Spalovací turbína se skládá z kompresoru, spalovací komory a turbíny – viz *obr. 3.1*.

Řada zařízení nejen v energetice často používá regenerační výměník (rekuperátor) řazený mezi kompresor a spalovací komoru (z hlediska toku média). Regeneračním výměníkem proudí horké spaliny z turbíny a ohřívají stlačený vzduch z kompresoru ještě před vstupem do spalovací komory.

Spalovací turbína může mít další zařízení, např. mezichladiče stlačeného vzduchu nebo spalinový výměník řazený mezi výstup z turbíny a komín (výfuk).



Obr. 3.1 – Schéma spalovací turbíny [1]

3.1 Kompresor

Kompresor je lopatkový stroj, který převádí mechanickou energii z hřídele na tlakovou. Slouží ke stlačení média – nasávaného spalovacího vzduchu proudícího do spalovací komory. U spalovacích turbín je často na stejné hřídeli jako turbína, která ho pohání.

Kompresory používané pro spalovací turbíny lze rozdělit na axiální a radiální a na jednostupňové a vícestupňové.

Axiálním kompresorem proudí nasávaný vzduch rovnoběžně s podélnou osou. U výkonnějších spalovacích turbín je vícestupňový, tzn. je tvořen větším počtem oběžných kol, mezi kterými jsou vloženy pevné statorové lopatky.

Do radiálního kompresoru vstupuje vzduch rovnoběžně s podélnou osou, ale vystupuje kolmo na osu otáčení. Často se objevuje u mikroturbín, může být jednostupňový i vícestupňový.

3.2 Spalovací komora

Spalovací komora je prostor, ve kterém probíhá hoření. Pod tlakem je do ní přiváděno palivo (pomocí palivového kompresoru, případně čerpadla) a vzduch, čímž dojde k vytvoření hořlavé směsi, která je při startu elektricky zapálena. Hořením směsi dochází k prudkému nárůstu objemu směsi a tvorbě spalín. Spalovací komora mívá tvar válce – síla. U modernějších zařízení včetně mikroturbín se stále častěji uplatňuje úspornější prstencová (anuloidová) spalovací komora obepínající hřídel.

3.3 Turbína

Turbína je lopatkový stroj, který převádí entalpii spalín na mechanickou energii. Přes turbínu expandují spaliny vzniklé ve spalovací komoře a roztáčí ji. Turbína tak slouží k pohonu vlastního kompresoru a možných dalších zařízení, např. elektrických generátorů, čerpadel, externích kompresorů apod.

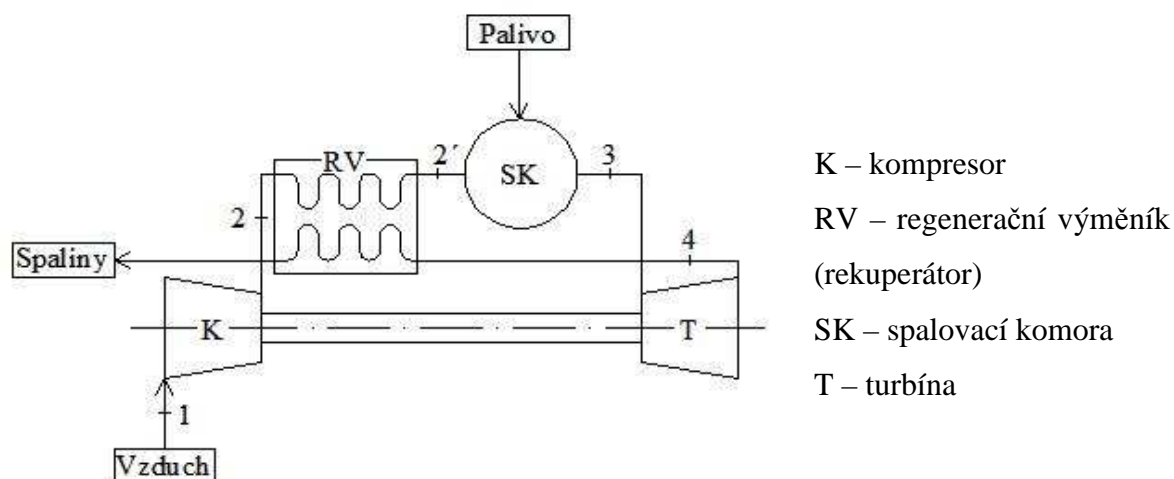
Stejně jako kompresory je možné rozdělit i turbíny na axiální a radiální a na jednostupňové a vícestupňové.

Pro axiální turbíny platí totéž, co pro axiální kompresory, avšak proudícím médiem není vzduch ale spaliny vystupující ze spalovací komory.

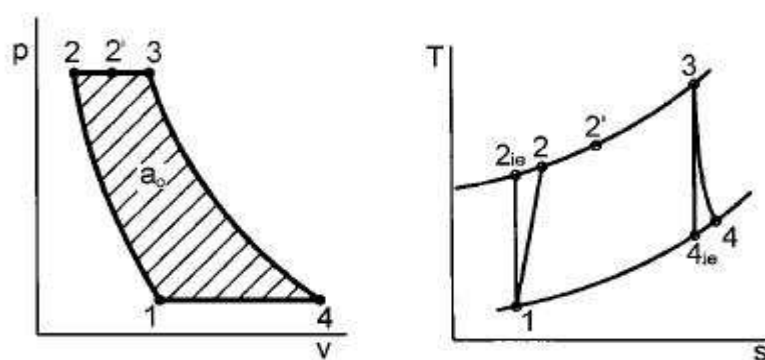
Tok média radiální turbínou je opačný než u radiálního kompresoru – spaliny vstupují kolmo na osu rotace a vystupují rovnoběžně.

3.4 Termodynamický princip

Stručné schéma spalovací turbíny a tok médií je představen na *obr. 3.1*, termodynamické změny média v $p - v$ a $T - s$ diagramech na *obr. 3.2*.



Obr. 3.2 – Schéma spalovací turbíny s regeneračním výměníkem [1]



Obr. 3.3 – Termodynamické změny v $p-v$ a $T-s$ diagramu [1]

Pro zjednodušení se uvažuje o uzavřeném Braytonově oběhu, kde hoření směsi paliva a vzduchu ve spalovací komoře je nahrazeno izobarickým přívodem tepla a pracovním médiem je ideální plyn, za který je možno do určité míry považovat vzduch. Dále všechny změny jsou nahrazeny ideálními vratnými termodynamickými změnami.

Bod 1 je charakterizován teplotou a tlakem (atmosférickým) okolí. Křivka mezi body 1 a 2 v $p-v$ diagramu představuje izoentropickou (adiabatickou) kompresi v kompresoru spalovací turbíny. Bod 2_{ie} v $T-s$ diagramu je koncovým bodem ideální (izoentropické) komprese, která je však v reálných podmínkách provozu uskutečňována polytropickou změnou, jejímž koncovým bodem je bod 2.

Křivka mezi body 2 a 3 představuje přívod tepla za stálého tlaku a tedy izobarickou změnu. Bod $2'$ popisuje stav média po průchodu regeneračním výměníkem, tzn. nárůst teploty po ohřátí od spaliny z turbíny. Bod 3 je koncovým bodem izobarického přívodu

tepla (popisuje stav média po průchodu spalovací komorou) a je charakteristický nejvyšší teplotou v celém oběhu.

Křivka mezi body 3 a 4 v $p - v$ diagramu představuje izoentropickou expanzi v turbíně spalovací turbíny. Bod 4_{ie} v $T - s$ diagramu je koncovým bodem ideální (izoentropické) expanze, která je však v reálných podmínkách uskutečňována polytropickou změnou, jejímž koncovým bodem je bod 4.

Křivka mezi body 4 a 1 představuje odvod tepla za stálého tlaku, tedy izobarické ochlazení spalin na teplotu okolí.

Vyšrafovaná plocha a_0 v $p - v$ diagramu představuje celkovou práci oběhu.

Termická účinnost spalovací turbíny s regeneračním výměníkem je pak dána vztahem

$$\eta_t = \frac{a_t - |a_k|}{q_a} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{(T_3 - T_2)}, \quad (3.1) [1]$$

kde a_t – práce vykonaná turbínou

a_k – práce spotřebovaná kompresorem

q_a – teplo dodané ve spalovací komoře

T_1, T_2, T_3, T_4 – teploty odpovídající krajním bodům Braytonova oběhu

Ze vztahu (3.1) je zřejmé, že účinnost takového zařízení bude tím vyšší, čím:

- větší bude rozdíl mezi teplotami média na vstupu a výstupu z turbíny,
- menší bude rozdíl teplot média na vstupu a výstupu z kompresoru,
- menší bude rozdíl teplot média na vstupu a výstupu ze spalovací komory.

Podmínku a) je možno splnit zvyšováním teploty ve spalovací komoře použitím paliv s vysokou výhřevností a dodáním většího objemu vzduchu. Výše teploty však musí respektovat materiály spalovací komory a hlavně turbíny, aby nedošlo k jejich poškození.

Podmínku b) je možno splnit použitím mezichlazení stlačeného vzduchu. Takovéto řešení se používá převážně u velkých spalovacích turbín, kde vzduch stlačuje více kompresorů (i vícestupňových), mezi které se mezichladiče instalují. Odebrané teplo je pak možno použít na ohřev vzduchu nebo vody pro technologické účely nebo vytápění.

Podmínku c) je možno splnit použitím regeneračního výměníku.

Řešení a) se příliš použít nedá, protože naráží na meze používaných (a použitelných) materiálů, které mohou pracovat pouze do určitých teplot a tlaků. V budoucnu se jistě najdou nové materiály, které umožní zvýšit teploty ve spalovací komoře a přitom celou spalovací turbínu moc neprodraží. V současnosti je však takovéto řešení příliš nákladné.

Řešení b) se uplatňuje převážně u větších zařízení s větším počtem kompresorů.

Řešení c) – regenerační výměník – představuje poměrně jednoduché technické zařízení, které je možno montovat jak do menších tak i do větších spalovacích turbín. Zároveň tvoří nejjednodušší způsob zvýšení účinnosti celého zařízení, protože dochází k částečnému využití odpadního tepla z turbíny k ohřevu stlačeného vzduchu ještě před spalovací komorou. Část tohoto tepla slouží ke zvýšení účinnosti (pomocí regeneračního výměníku), část se může využívat jinak (pomocí spalínového výměníku k sorpčnímu chlazení, ohřevu vzduchu nebo vody pro technologické procesy a vytápění, aj.).

Termická účinnost spalovací turbíny bez regeneračního výměníku je dána vztahem:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_p (T_{4ie} - T_1)}{c_p (T_3 - T_{2ie})} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_p^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}, \quad \varepsilon_p = \frac{p_2}{p_1}, \quad (3.2) [1]$$

kde c_p – měrná tepelná kapacita média (ideálního plynu – vzduchu) za stálého tlaku

T_1, T_3 – teploty odpovídající krajním bodům Braytonova oběhu

T_{2ie}, T_{4ie} – teploty odpovídající krajním bodům Braytonova oběhu při ideální (izoentropické) změně

κ – Poissonova konstanta

ε_p – kompresní poměr

p_1 – tlak na počátku a na konci oběhu (tlak okolí, atmosférický tlak)

p_2 – tlak po kompresi v kompresoru, spalovací komoře a na vstupu do turbíny.

3.5 Rozdělení spalovacích turbín podle výkonu

Podle výkonu lze malé spalovací turbíny rozdělit na:

a) mikroturbíny o výkonu asi do 200kW

- b) miniturbíny o výkonu asi od 200kW do 1MW
- c) malé turbíny o výkonu asi od 1MW do 6MW [2].

Pokud není uvedeno jinak, jedná se o elektrický výkon.

Teplárenské spalovací turbíny dosahují výkonu asi do 50MW, největší elektrárenské i výkonu 300MW až 400MW. Tyto turbíny jsou vyráběny kusově, proto jsou jejich ceny velmi vysoké.

Některé firmy (Capstone Turbine Corp., Solar Turbines, Bowman Power, Elliot Energy Systems, Ingersoll-Rand, Kawasaki Gas Turbines, Siemens-Westinghouse a další) zavedly sériovou výrobu mikroturbín, miniturbín a malých turbín, čímž došlo ke snížení jejich ceny. Výrobci na trhu vytvořili konkurenční prostředí a vytvářejí tlak na další pokles cen.

4 Mikroturbíny

Mikroturbíny představují zcela novou generaci spalovacích turbín, s jinou aplikační i výrobní filozofií. Výrobci sázejí na měřítko množství, namísto dosavadního měřítka velikosti. Tzn., že vyrábějí sériově větší množství méně výkonných zařízení určených hlavně pro decentralizované použití, namísto kusové produkce vysokovýkonných spalovacích turbín pro centralizovanou výrobu v teplárnách a elektrárnách. Další novinkou oproti dosavadním větším turbínám je i použití vysokorychlostních generátorů.

Nové je hlavně to, že rotor generátoru vydrží vysoké otáčky, které jsou pro mikroturbíny typické, a proto odpadá nutnost použít převodovku. Bez převodovky je celé soustrojí mnohem kratší a lehčí, takže v případě nutnosti je možno umístit jej i do vyšších pater budov nebo používat jako mobilní zdroj elektřiny a tepla. Vysokootáčkový generátor je při stejném výkonu mnohem menší a lehčí.

Někteří výrobci používají místo klasických ložisek ložiska vzduchová, která vydrží až 100 000 ot. /min., čímž kompletně odpadá olejové hospodářství takového zařízení. Protože už není nutné kontrolovat stav oleje, zajišťovat jeho výměnu a následnou likvidaci, je takovéto řešení provozně velmi výhodné a levné, navíc i ekologické.

Jak již bylo řečeno, mikroturbíny mívají jediný pohyblivý díl, zatímco plynové motory jich mohou mít i přes 100. Nejběžnější mikroturbíny mají na společné hřídeli jednostupňový radiální kompresor a jednostupňovou radiální turbínu (případně i

vysokootáčkový generátor) – viz *obr. 4.1*. Za pozornost jistě stojí, že průměr oběžného kola (kompresoru i turbíny) bývá okolo 100mm. Mikroturbíny takovéto koncepce vyrábí např. firma Capstone Turbine Corp.



Obr. 4.1 – Soustrojí mikroturbíny firmy Capstone Turbine Corp. [4]

4.1 Regenerační výměník (rekuperátor)

Pomocí regeneračního výměníku je možno dosáhnout vyšší účinnosti spalovací turbíny. Tímto výměníkem totiž proudí horké spaliny z turbíny, které předají část svého tepla stlačenému spalovacímu vzduchu, vystupujícímu z kompresoru, ještě před vstupem do spalovací komory. Použitím rekuperátoru je možno snížit množství potřebného tepla dodaného ve spalovací komoře, tedy snížit množství spotřebovaného paliva, protože část tepla dodá rekuperátor.

Pokud je spalovací turbína používána jen k výrobě elektrické energie, zbylá část tepla za rekuperátorem už není využívána a je vyfukována do okolí. Tento způsob provozu však není příliš ekonomický (náklady na takovouto výrobu elektřiny jsou vysoké), ale je možno použít jej v místech, kde vzniká odpadní palivo (tekuté nebo plynné) a není potřeba topení (např. skládka odpadů).

4.2 Spalinový výměník

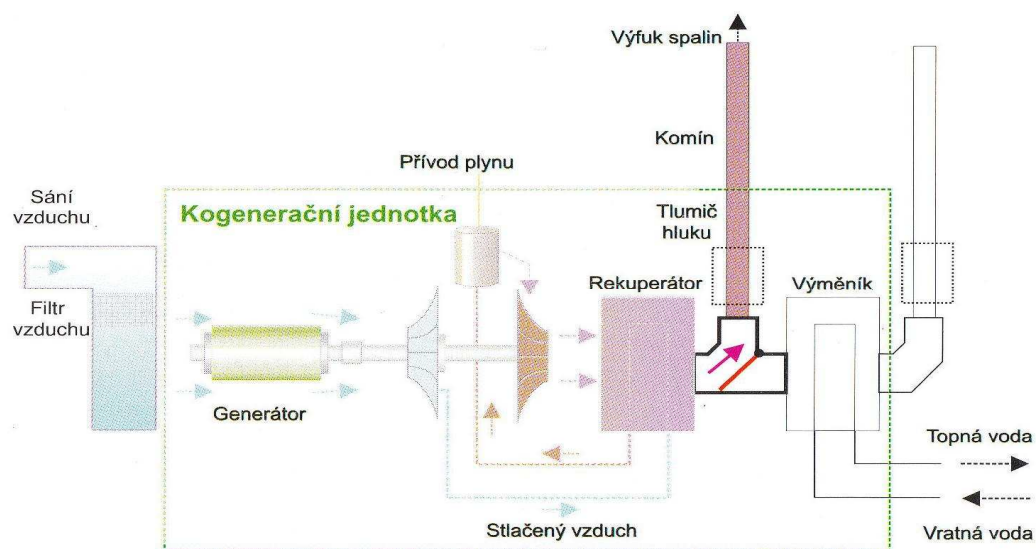
V případě potřeby současné výroby tepla a elektřiny (kogenerace) je za rekuperátorem řazen spalinový výměník. Ten umožňuje využít velkou část tepla spalin z turbíny. V případě mikroturbín se používá k ohřevu vody k topení nebo chlazení. U větších turbín může být používán k výrobě páry, která může být použita pro technologické účely, k vytápění nebo k výrobě elektřiny v parní turbíně. Důležitým znakem spalinových výměníků je odolnost vůči rychlým a vysokým změnám teplot při najíždění na plný výkon. Spalinové výměníky mohou být dodávány v jednom kontejneru s mikroturbínou, nebo odděleně. Jeden spalinový výměník může být společný pro více turbín.

4.3 Sací a výfukový trakt

Sací trakt (jak už název napovídá) slouží k přívodu spalovacího vzduchu ke kompresoru. Součástí sacího traktu mikroturbín je vzduchový filtr, který musí zamezit přístupu tuhých částic do zařízení. Tuhé částice mohou snadno způsobit poškození kompresoru a turbíny, protože turbokompresorové soustrojí dosahuje velmi vysokých otáček.

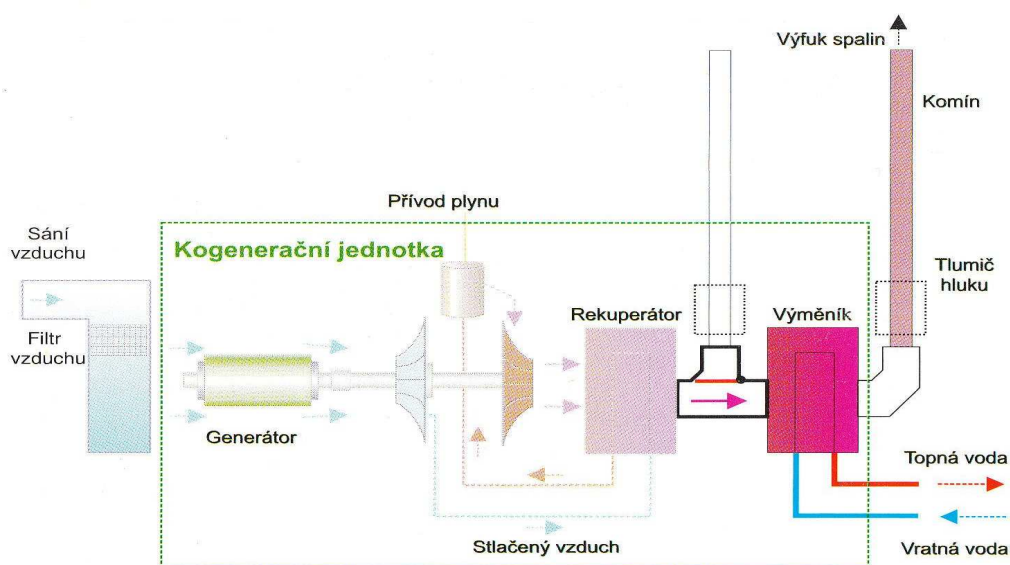
Výfukový trakt slouží k odvodu spalin. Pro venkovní provedení se používá krátký výfukový trakt, při vnitřní instalaci je delší (musí odvést spaliny mimo objekt) a jeho součástí jsou spalinovody, tlumič hluku a komín.

U některých zařízení se používá bypass neboli obtok spalin kolem spalinového výměníku přímo do komína. Toto uspořádání se používá hlavně u zdrojů pracujících převážně v režimu záložního zdroje, kdy vyrábí pouze elektrickou energii – viz *obr. 4.2*, nebo i u jiných zdrojů, pokud zrovna nevzniká potřeba tepla. Turbínu je totiž možno najet na plný výkon rychleji než výměník, který se musí vyrovnávat s velkou změnou teploty.



Obr. 4.2 – Mikroturbína jen jako zdroj elektrické energie [2]

Mikroturbína s bypassem pracující v typickém kogeneračním režimu je na obr. 4.3.



Obr. 4.3 – Mikroturbína jako kogenerační zdroj [2]

4.4 Palivové hospodářství

Mikroturbíny spalují ve většině případů zemní plyn, ale i bioplyn, a to s obsahem metanu alespoň 50%, i když proběhly úspěšné testy s plynem o obsahu pouze 30% metanu. Existují také turbíny na kapalná paliva, např. na lehký topný olej (LTO), propan, metanol aj. nebo tzv. dvoupalivové turbíny, které jsou schopny při výpadku dodávek plynu najet na

spalování záložního kapalného paliva. Zařízení o výkonu nad 500kW jsou schopny najet na záložní palivo plynu, bez nutnosti odstávky a nového startu.

Nejběžnější mikroturbíny spalující zemní plyn jsou napojeny na středotlaký rozvod zemního plynu o tlaku do 0,4MPa, pro svůj provoz však potřebují tlak paliva 0,4 až 0,8MPa. Proto musí být vybaveny kompresorem paliva, který dodává plyn o dostatečném tlaku. Kompresor může být součástí kontejneru (u nejmenších jednotek), nebo je dodáván a instalován samostatně.

Plyn před vstupem do mikroturbíny je nutno vyčistit od případných tuhých látek na palivových filtrech, aby nedošlo k jejímu poškození.

Součástí palivového traktu jsou bezpečnostní uzavírací ventily, které uzavřou přívod paliva a odstaví tak celé zařízení při nestandardních podmínkách, např. při příliš vysoké teplotě rekuperátoru, spalínového výměníku, poklesu průtoku vody výměníkem aj. Palivové vedení může obsahovat také regulační ventil ovládající množství paliva přiváděného do spalovací komory a tím regulovat výkon mikroturbíny.

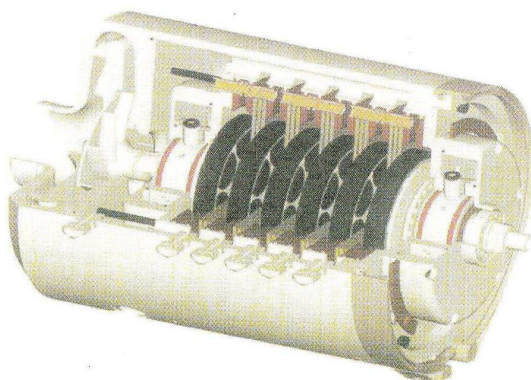
4.5 Elektrické součásti

Aby mikroturbína mohla pracovat jako kogenerační zdroj, je nutné osadit ji generátorem elektrického proudu, který zároveň u menších jednotek plní funkci elektromotoru, který roztáčí soustrojí jako startér. K připojení generátoru k soustrojí zaujímají výrobci dva odlišné přístupy.

První přístup spočívá v použití klasických generátorů, kde je nutné převést výkon ze soustrojí mikroturbíny na generátor pomocí mechanické převodovky, která zároveň slouží ke snížení otáček (např. z 60 000 až 80 000 ot. /min) na hodnotu vyžadovanou generátorem (3000 nebo 1500 ot. /min). Použitím tohoto řešení se ztrácí jedna z výhod mikroturbín – nulové olejové hospodářství. Mikroturbíny této konstrukce vyrábí např. firmy Ingersoll-Rand, Elliot Energy Systems, Turbec AB. Tyto firmy zároveň používají olejem mazaná ložiska, proto mikroturbíny jejich produkce nedosahují tak extrémně vysokých otáček a vyžadují stálou kontrolu stavu oleje, případně jeho výměnu a likvidaci.

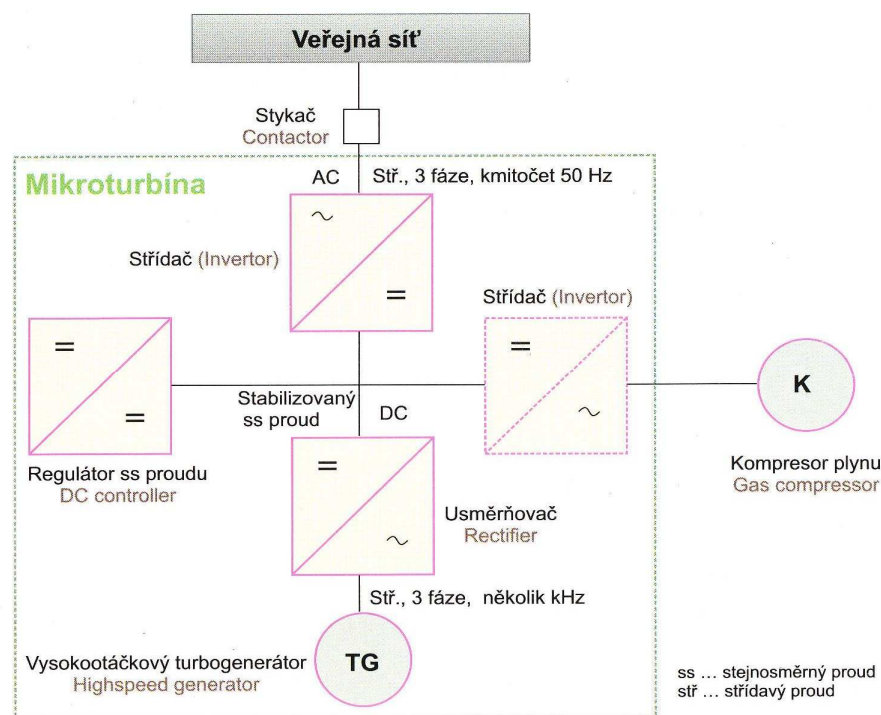
Druhý přístup je založen na použití vysokootáčkových generátorů. Tyto generátory jsou instalovány přímo na hřídel mikroturbíny a dosahují tak vysokých otáček – až 100 000 ot. /min. Uvádí se, že použité materiály vydrží až 120 000 ot. /min. Většinou se jedná o

asynchronní generátory, jejichž rotor je tvořen permanentními magnety. Používají se dvě odlišná konstrukční řešení. Magnetické pole je buď kolmé na osu otáčení (jako u klasického elektromotoru) nebo rovnoběžné. V tom případě je rotor tvořen soustavou disků, mezi nimiž jsou disky statoru – viz *obr. 4.4*. Vznikající proud o velmi vysoké frekvenci je pak odváděn ze statorového vinutí do tzv. elektronické převodovky.



Obr. 4.4 – Řez vysokootáčkovým diskovým generátorem Turbo Genset [2]

Elektronická převodovka má za úkol snížit frekvenci vystupujícího proudu na hodnotu vyžadovanou sítí. Její součástí jsou střídače (invertory) a usměrňovače – viz *obr. 4.5*. Vygenerovaný elektrický proud o frekvenci např. 1600Hz, což odpovídá 96 000 ot. /min, je nejdříve usměrněn a pak pomocí střídače upraven na požadovanou frekvenci 50Hz. Aby bylo možné mikroturbínu nastartovat pomocí baterie, je nutno doplnit zařízení o další střídač, který převede stejnosměrný proud z baterie na proud střídavý. Ten pak roztočí generátor, který v té chvíli funguje jako motor, a celé soustrojí.

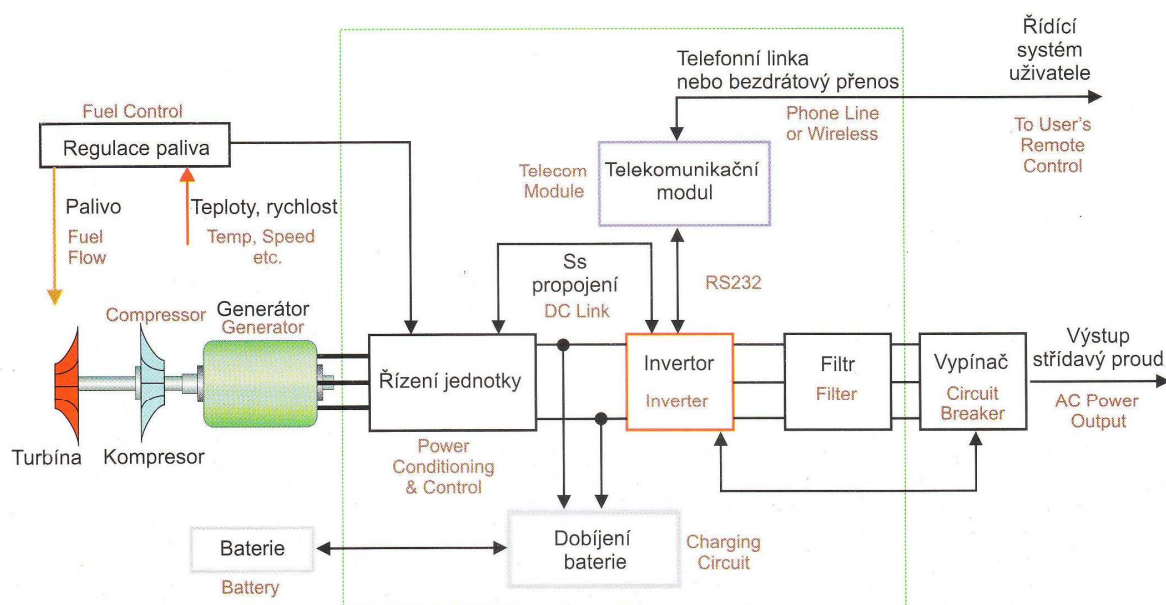


Obr. 4.5 – Schéma elektronické převodovky [2]

Elektronická převodovka je malé zařízení bez olejového hospodářství, které potřebuje jen velmi omezenou údržbu. Umožňuje plynulý přechod od odebírání proudu ze sítě (během startu mikroturbíny odběrem proudu z rozvodné sítě) přes nulu a plynulý nárůst až po maximální proud odpovídající nastavenému výkonu. Ke startu jednotky je potřeba asi desetina elektrického výkonu generátoru. V závislosti na velikosti jednotky trvá najetí na jmenovitý výkon asi od 90 do 300s.

Důležitou součástí kogenerační jednotky je řídicí systém – viz obr. 4.6 a systém připojení jednotky do sítě. Řídicí systém kontroluje správnost chodu jednotky na základě dat získávaných z čidel teploty (vstupujícího vzduchu, rekuperátoru, spalin, spalinového výměníku), tlaku (spalin před a za spalinovým výměníkem, paliva) a průtoku (vody spalinovým výměníkem). Tento systém může obsahovat více mikroprocesorů, z nichž jeden je nadřazený a další kontrolují a regulují jednotlivé části mikroturbíny, případně navazující vnější zařízení (oběhové čerpadlo, ventilaci místnosti, případný únik plynu atd.). Nadřazený mikroprocesor pak při nestandardních podmínkách provozu rozhodne o odstavení jednotky. Odstavení jednotky může nastat i působením elektrických ochranných zařízení při nežádoucím stavu elektrické sítě. Jednotku je možno řídit na dálku pomocí telefonní nebo bezdrátové linky.

Bowman Turbogen System Schematic



Obr. 4.6 – Schéma řízení a přenosu dat podle Bowman Turbogen [2]

4.6 Způsoby provozu kogenerační jednotky s mikroturbínou

Kogenerační jednotku s mikroturbínou lze provozovat třemi způsoby:

- v ostrovním režimu
- paralelně s rozvodnou sítí
- v režimu záložního zdroje.

Ostrovní provoz jednotky znamená dodávku elektřiny do samostatné sítě a spotřebu tepla (chladu) v místě výroby. „Ostrov“ může tvořit například podnik s potřebou stálé a kvalitní dodávky elektrické energie. Tento podnik pak platí za palivo (nejčastěji zemní plyn), pokud mu neslouží jako palivo vlastní odpadní produkt technologie, a veřejnou rozvodnou síť si platí pouze jako záložní zdroj, používaný při výpadku paliva.

V ostrovním režimu pracuje např. chemická továrna Harbec Plastic Inc., sídlící v Ontariu, USA. Firma se zabývá výrobou plastů a jejich opracováním pro použití v komunikačních, bezpečnostních, obranných a vesmírných technologiích. V trvalém trigeneračním režimu zde pracuje 20 mikroturbín Capstone C30 (o elektrickém výkonu

30kW), 5 dalších se připojí v případě zvýšené potřeby elektrické energie (nepoužívají spalínový výměník, pracují pouze jako elektrické generátory). [7]

Paralelně s rozvodnou sítí lze jednotku provozovat např. u čističek odpadních vod (ČOV) nebo na skládkách odpadů, kde je vyrobená elektrická energie používána pro vlastní potřebu a přebytky se dodávají do rozvodné sítě. V obou zmíněných příkladech je palivo (bioplyn) zdarma – vzniká aerobní nebo anaerobní činností mikroorganismů. Již delší dobu zde fungují kogenerační jednotky s plynovými motory, proto zřejmě případný přechod na mikroturbíny nebude obtížný. Problémem je však stále ještě vyšší cena mikroturbíny v porovnání s plynovým motorem. Na skládce odpadů pak ještě vzniká další problém s nevyužitelností vyrobeného tepla, které se neúčelně maří. U ČOV takováto situace nenastává, protože teplo se dá velmi dobře využít k vyhřívání vyhnívacích nádrží.

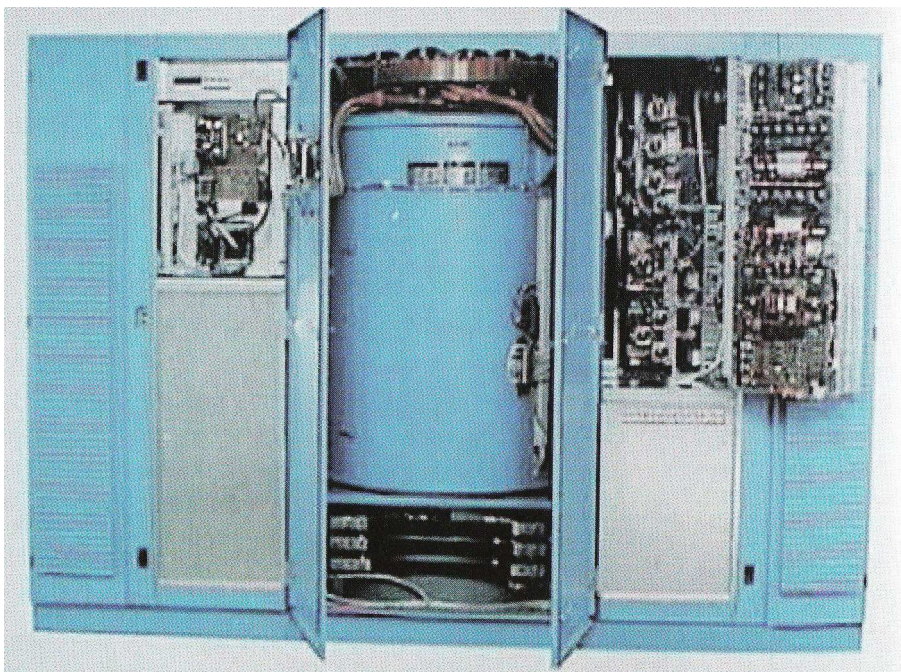
Jednotka může být dále provozována v režimu záložního zdroje, který slouží převážně pro výrobu elektřiny. V tomto případě nemusí obsahovat spalínový výměník. Pokud je elektřina používána i pro přípravu teplé užitkové vody (TUV) nebo pro vytápění, může jednotka po připojení spalínového výměníku sloužit jako plnohodnotný kogenerační zdroj. Pro používání mikroturbíny v tomto režimu je vhodné doplnit ji o bypassový komín, který umožní rychlé njetí na plný výkon. Umožní totiž odvést spaliny mimo spalínový výměník, kterému hrozí poškození při vysokém nárůstu teplot v krátkém časovém úseku.

Jako záložní zdroj bude zřejmě používána v institucích, kde je nutná rychlá obnova dodávek elektrické energie – nemocnice, státní instituce, banky, výpočetní centra aj. Než najede na plný výkon záložní zdroj, je možné použít například UPS nebo rotační setrvačnick s následnou výrobou elektřiny.

UPS (Uninterruptible Power Supplies), čili zdroje „nepřerušitelného“ napájení, jsou zařízení, jejichž funkcí je zpravidla krátkodobá (minuty až hodiny) dodávka energie v případě nestability vstupního napětí či při úplném výpadku sítě. Úlohou UPS je chránit data a citlivá zařízení před poškozením vlivem nepředvídaných událostí v síti jako jsou šumy, rázy, napěťové špičky, poklesy napětí nebo úplné výpadky. Při výpadku elektrické energie dodává energii ze svých akumulátorů. Vzhledem k ceně elektronických zařízení a přenášených dat jsou UPS nezbytným vybavením všech informačních systémů. Pracují však také na místech, kde výpadek elektrické energie může znamenat ohrožení zdraví a života nebo značné materiální ztráty. [10]

Rotační setrvačnick s následnou výrobou elektřiny – viz *obr. 4.7* – je zařízení, které využívá setrvačnosti rotujícího hřídele. Při normálním provozu funguje jako motor, který udržuje rotor v optimálních otáčkách. Při výpadku elektrické energie se jeho funkce změní

na generátor. Ten pak vyrábí elektřinu po dobu několika desítek sekund až několika minut. Podobně jako mikroturbína je vybaven elektronickou převodovkou.



Obr. 4.7 – Rotační setrvačnick s následnou výrobou elektřiny ve skříni rozvaděče [2]

5 Srovnání mikroturbíny s pístovým spalovacím motorem

Spalovací motory používané v kogeneračních jednotkách jsou odvozeny z Dieselova nebo Ottova motoru. Čtyřtákní Dieselův motor spaluje kapalná i plynná paliva. Na rozdíl od Ottova motoru se palivo do válců vstříkuje až po kompresi vzduchu (v horní úvrati pístu) pomocí čerpadla či kompresoru, čímž se díky vysoké teplotě zapálí, expanduje a stlačí píst dolů. V dolní úvrati pístu se v horní části válce otevře výfukový ventil a spaliny jsou pak vytlačeny pohybem pístu nahoru. Při dalším pohybu pístu dolů se uzavře výfukový ventil a otevře se sací ventil, kterým se do válce nasaje vzduch a vše se opakuje.

Čtyřtákní Ottův motor pracuje prakticky na stejném principu, jen s tím rozdílem, že do válce se nasává směs paliva a vzduchu a k zážehu nedochází samovolně, ale pomocí elektrické svíčky. Stejně jako Dieselův motor je schopen spalovat jak kapalná tak i plynná paliva.

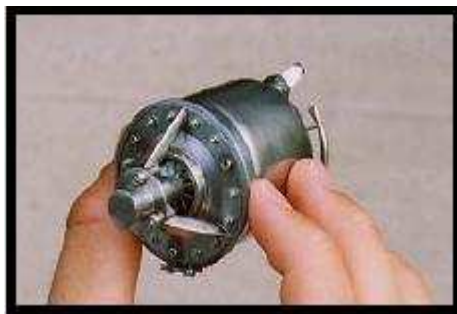
Mezi hlavní výhody spalovacích motorů patří více než stoletý vývoj, velké zkušenosti se sériovou výrobou, provozem a údržbou, stejně jako velká rozšířenost a znalost mezi lidmi a především nízká pořizovací cena.

Mezi hlavní nevýhody patří vysoký počet pohyblivých dílů (i více než 100 především v závislosti na počtu válců) a tedy i vyšší pravděpodobnost poruchy, což s sebou nese nutnost častějších kontrol a odstávek. Navíc produkuje velké množství emisí, které je nutno redukovat. Je to dáno především přerušovaným spalovacím procesem. Další nevýhodou může být velmi omezená možnost řízení spalovacího procesu.

Oproti motorům mají mikroturbíny minimum pohyblivých dílů – turbokompresorové soustrojí a palivové čerpadlo nebo kompresor. Některé mikroturbíny (především Capstone) používají vzduchová ložiska a vysokootáčkové generátory elektrické energie, takže nepotřebují olejové hospodářství. Další výhodou je nepřerušovaný spalovací proces, při němž vzniká méně emisí, a jeho snadné řízení. Mikroturbíny mají ve srovnání s motory menší rozměry i hmotnost. Vyznačují se nižšími vibracemi a menším počtem kontrol a odstávek. Střední doba mezi poruchami pro mikroturbíny Capstone (tyto turbíny jsou nejrozšířenější) je 14 000 až 15 300 provozních hodin, tedy asi 1,5 roku [4]. Dále se vyznačují nízkými provozními náklady (v závislosti na použitém palivu).

Jednou z mála nevýhod je zatím stále ještě vyšší pořizovací cena.

Stejně jako motory je možno použít i mikroturbíny nejen jako mobilní zdroje elektrické energie, případně i tepla a chladu, ale i jako mechanický pohon externích čerpadel nebo kompresorů. V mobilní verzi spalují kapalná paliva, převážně naftu nebo kerosin. Kontejnery s kogenerační jednotkou se montují na nákladní automobily. Díky menším rozměrům i hmotnosti jsou auta lépe ovladatelná a umožňují rychlé nasazení v oblastech postižených přírodní katastrofou (zemětřesením, následky vichřic,...), případně při velkých společenských akcích (koncerty, sportovní události,...). Výhody malých přenosných zdrojů elektrické energie s mikroturbínou neunikly ani pozornosti americké armády. Ta se snaží vyvinout malou jednotku s elektrickým výkonem okolo 1kW, váhou do 1kg a velikostí asi jako plechovka od piva [5] – viz *obr. 5.1*.



Obr. 5.1 – Armádní miniaturní spalovací turbína bez elektrického generátoru [5]

6 Možnosti využití v MS kraji

Moravskoslezský kraj nabízí relativně širokou nabídku paliv, která nacházejí své uplatnění v kogeneračních jednotkách. Těmito palivy může být samozřejmě zemní plyn, ale i jiné plyny, vznikající jako odpad v důsledku aerobní či anaerobní činnosti mikroorganismů na ČOV nebo skládkách odpadů, odplyněním likvidovaných důlních jam nebo uzavřených důlních prostor. Dále pak může jít o karbonský zemní plyn, těžený pomocí povrchových vrtů, které slouží pro degazaci horninového masivu v oblastech panenských uhelných slojí.

Kogeneraci však zajišťují pouze jednotky s pístovými spalovacími motory. Jednotky s mikroturbínami v MS kraji nejsou využívány. V celé ČR byly postaveny pouze dvě jednotky s mikroturbínami.

Jedna je v Českém Brodě ve Středočeském kraji. Jako palivo používá zemní plyn. Je určena k vytápění sídliště. Část vyrobené elektrické energie (asi 15%) je používáno na vlastní provoz jednotky (řídící elektronika), zbytek je dodáván do sítě. Jednotka má elektrický výkon 30kW, tepelný 60kW. [2]

Druhá jednotka byla instalována v ČOV Praha – Hrušovice jako demonstrační zařízení, kde sloužila ke spalování bioplynu. Měla stejné výkony jako jednotka v Českém Brodě. V současné době je na VŠCHT v Praze, kde probíhají další testy a měření. [9]

6.1 Zemní plyn

Zemní plyn je významné fosilní palivo, které při spalování uvolňuje nejmenší podíl CO_2 na jednotku uvolněné energie, proto bývá považován za ekologické palivo. Nachází se buď samostatně, nebo v ložiscích s ropou. Mívá velmi vysoký obsah metanu – i přes 90%.

Kogenerační jednotka s mikroturbínou by mohla nahradit některé centrální zdroje tepla (CZT), založené na jednotkách s pístovými motory. Mohlo by se jednat např. o vytápění části města Jeseníku, kde pracuje osm kogeneračních jednotek Tedom o tepelném výkonu 18,1MW a elektrickém výkonu 626kW, spalujících zemní plyn. Dvě jednotky dodávají vyrobenou elektrickou energii do rozvodné sítě, zbylých šest pokrývá spotřebu kotelny.

Další možností by mohlo být nahrazení motorů autobusů na stlačený zemní plyn (CNG). Mikroturbína vyrábí elektrickou energii, kterou nabíjí akumulátory. Ty pak pohánějí elektromotor. Takovéto řešení by umožnilo využít další výhodu – rekuperaci energie při brzdění, kdy by elektromotor fungoval jako generátor a chvilku by nabíjel akumulátory společně s mikroturbínou. Autobusy takovéto koncepce jezdí např. v americkém městě Chatanooga – viz *obr. 6.1*.



Obr. 6.1 – Hybridní autobusy s mikroturbínou Capstone, Chatanooga, USA [2]

6.1 Bioplyn

Bioplyn vzniká aerobní nebo anaerobní činností mikroorganismů za vhodných podmínek (vhodná potrava, teplota). Je možné čerpat ho ze skládek odpadů, vyhnívacích nádrží na ČOV nebo bioplynových stanic a následně využívat.

Před vlastním vstupem do kogenerační jednotky je nutné vyčistit bioplyn od siloxanů. Siloxany jsou organické sloučeniny křemíku, které při spalovacím procesu vytvoří jemný křemičitý písek, který se usazuje v turbíně a rekuperátoru turbíny.

Mikroturbína CR30 (elektrický výkon 30kW) firmy Capstone Turbine Corp. si dokážou poradit s koncentrací sirovodíku až 70 000 ppm ($=56\,250\text{ mg/m}_N^3$), výkonnější modely s 5 000 ppm ($=4\,018\text{ mg/m}_N^3$), což prakticky znamená, že v některých případech nepotřebují další filtry na sirovodík. [4]

U skládek odpadů je problém se vznikajícím teplem, které nelze smysluplně využít a je vypouštěno do okolí. Elektrickou energii lze použít pro vlastní provoz skládky a případné přebytky dodávat do sítě. Např. na skládce v Ostravě – Hrušově by kogenerační jednotka s mikroturbínou mohla nahradit jednotku s pístovým motorem Tedom Quanto C770 SP BIO o elektrickém výkonu 2x456kW [8], ale je otázkou, jestli by takováto náhrada stála za to.

U bioplynových stanic a ČOV lze teplo dobře využít k vyhřívání vyhnívacích nádrží, ve kterých vzniká bioplyn.

6.2 Důlní plyn

Důlní plyn se přirozeně vyskytuje v důlních prostorách. Obsahuje metan v rozmezí 30 – 75%. Společně se vzduchem tvoří nebezpečnou výbušnou směs. Proto se musí odčerpávat. Díky poměrně vysokému obsahu metanu je možné jej energeticky využívat. K důlnímu plynu lze přiřadit i karbonský plyn, který se vyskytuje v blízkosti uhelných slojí.

Společnost Green Gas DPB, a.s. je v MS kraji jednou z největších, která se těžbou a zpracováním důlního plynu zabývá. Provozuje 18 kogeneračních jednotek založených na pístovém spalovacím motoru o celkovém instalovaném elektrickém výkonu 22MW. Nejčastější používanou jednotkou je Tedom Quanto D 1600 SP CON s parametry:

Výkon [kW]		Účinnost [%]		Příkon v palivu [kW]	Spotřeba paliva [m_N^3/h]
Elektrický	Tepelný	Elektrická	Tepelná		
1558	1584	42,5	43,2	3666	777

Jednotka spaluje důlní plyn s obsahem metanu 50%, tj. o průměrné výhřevnosti 17MJ/m_N^3 . [6]

Tato jednotka by se případně dala nahradit např. mikroturbínou C1000 firmy Capstone Turbine Corp. s parametry:

Výkon [kW]		Účinnost [%]		Příkon v palivu [kW]	Spotřeba paliva [m ³ /h]	Emise NO _x	
Elektrický	Tepelný	Elektrická	Tepelná			[ppm]	[mg/m ³]
1000	1267	33	38	3333	706	9	18

Jedná se o platformu o rozměrech 2,4 x 9,1 x 2,9m a váze 14 106kg, do které je instalováno 5 mikroturbín typu C200, každá o elektrickém výkonu 200kW. Emise NO_x jsou přepočteny na 15% podíl O₂. [4]

7 Závěr

Mikroturbíny jako kogenerační zdroje i jako zdroje čistě k výrobě elektrické energie mají před sebou jistě velkou budoucnost. Výrobci produkují stále nová zařízení, která se uplatní v sériové výrobě a budou tak snižovat jejich ceny. Spolu s poklesem cen bude patrný nástup nových technologií, které zvýší účinnost mikroturbín. Jako perspektivní se jeví zvláště používání keramiky na konstrukci především turbíny, díky níž vydrží vyšší teplotu spalin. Ekology jistě potěší i nízké emise a schopnost spalovat bioplyn či různé produkty tepelného zpracování (např. pyrolýzy) dřeva a některých odpadů.

Mikroturbíny pracují úspěšně takřka po celém světě, není proto mnoho důvodů, proč by neměly najít uplatnění i u nás, a to ve větší míře, než dosud.

8 Použité zdroje

- [1] KADLEC, Z. *Podklady k předmětu Termomechanika*
- [2] ŠUROVSKÝ, J. *Mikroturbína*. Instalace Praha, 2003
- [3] cs.wikipedia.org – Otevřená internetová encyklopedie
- [4] www.capstoneturbine.com – Stránky firmy Capstone Turbine Corp.
- [5] www.darpa.mil – Stránky americké agentury pro pokročilé vojenské technologie
- [6] www.dpb.cz – Stránky firmy Green Gas DPB, a.s.
- [7] www.harbec.com – Stránky firmy Harbec Plastics Inc.
- [8] www.tedom.cz – Stránky společnosti Tedom
- [9] www.techtydenik.cz – Stránky časopisu Technický týdeník
- [10] www.ups.cz – Stránky společnosti UPS Technology, spol. s r.o.

9 Přílohy

CD ROM obsahující:

- text bakalářské práce (Bakalářská práce.doc, Microsoft Word 2003)
- text bakalářské práce (Bakalářská práce.pdf)